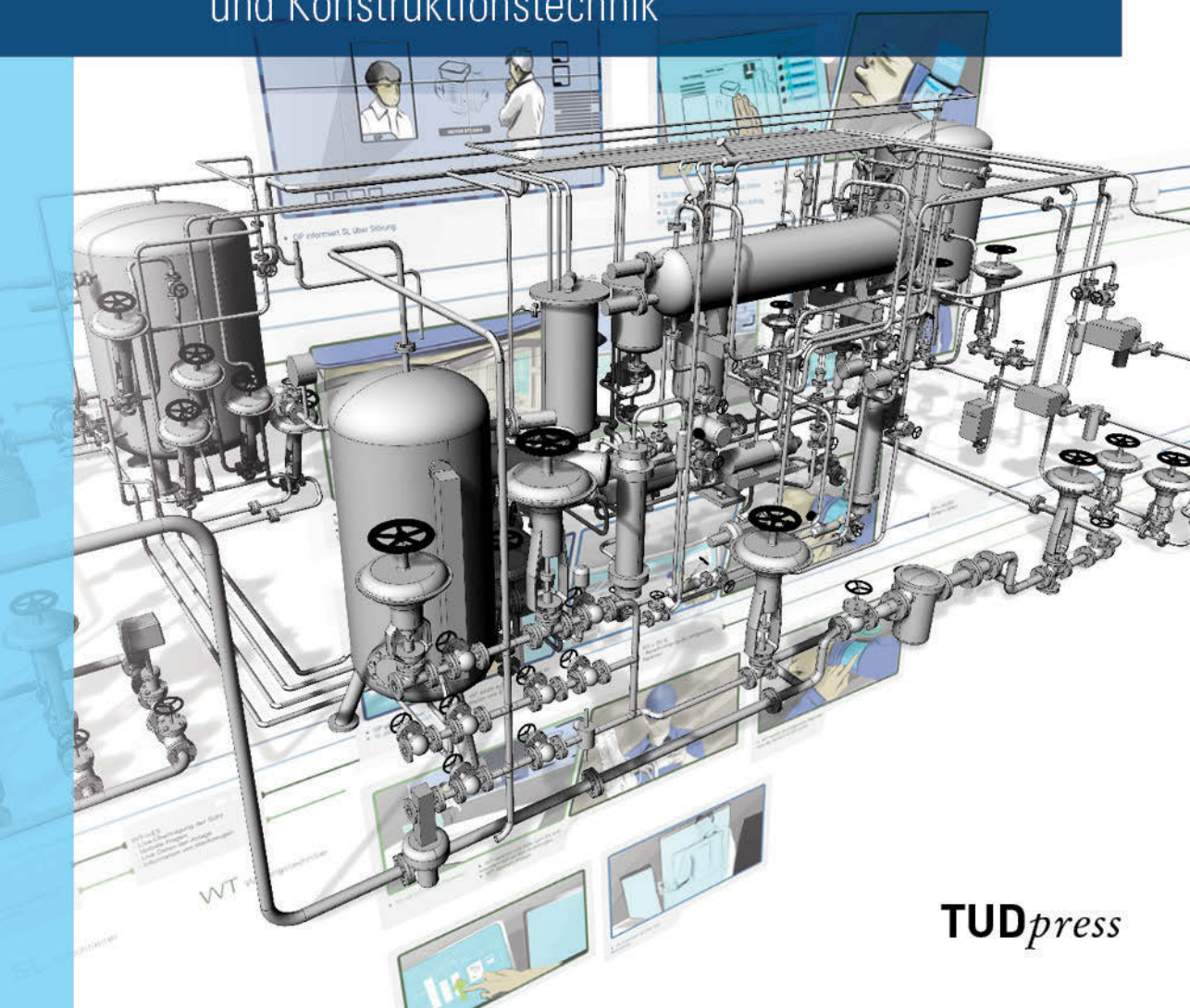


Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik



TUDpress

Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN** ENTWICKELN **ERLEBEN** 2016
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Herausgeber: Ralph Stelzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel
Eckhard Richter & Co. OHG
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>



KOMPLEXITÄT

DREHT SICH IMMER
NUR IM KREIS.

EINFACH

TRIFFT
ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf sap.de/runsimple



Run Simple

Datenqualität in Rapid Prototyping Prozessen

Carsten Haugwitz

Inhalt

Die Technologien des Rapid Prototypings erreichen eine immer größer werdende Marktdurchdringung und erweitern die Möglichkeiten von Ingenieuren und Spezialisten angrenzender Fachbereiche. Je nach Datenursprung werden Schnittstellen wie Step oder STL genutzt oder es sind Zwischenschritte erforderlich, um die Daten aus 3D Scannern oder bildgebenden Quellen (CT; MRT) weiter zu verarbeiten. Dabei gibt es Fehler und Ungenauigkeiten in der Datenkette, die analysiert hier werden sollen.

Aus den Kenntnissen über die Fehler sollen Methoden aufgezeigt werden, um die Datenqualität zu erhöhen, die Datenmengen zu verringern und die Prozesse zu stabilisieren.

Data quality rapid prototyping processes

The rapid prototyping technologies achieve a bigger market penetration and expand the capabilities of engineers and specialists fields. Depending on the data source interfaces such as Step or STL are used or there are intermediate steps required to process the data from 3D scanners or imaging sources such as CT, MRI or X-ray on. There are errors and inaccuracies in the data flow, which have to be analyzed.

Methods are from the knowledge of the errors are pointed out, which will enable to increase the data quality and to make the process more stable.

Einführung

Der Begriff Rapid Prototyping beschreibt ein additives Fertigungsverfahren, dass sich besonders gut zur Herstellung von Prototypen eignet. Dabei werden CAD-Modelle im Computer erstellt und über die Schnittstelle STL

an einen 3D-Drucker übergeben. Dieser verfügt über eine spezielle Software, die die Modelle im Bauraum des 3D-Druckers anordnet. Zusätzlich berechnet diese Software Elemente, die nicht gefertigt werden können, weil sie „in der Luft“ schweben. Für diese Bereiche wird eine Stützstruktur zusätzlich zum eigentlichen Bauteil berechnet und gefertigt. Anschließend kann diese Stützstruktur je nach Verfahren weggebrochen oder ausgewaschen werden. Beim Auswaschen benötigt man einen zweiten Druckkopf und eine zweites Materialreservoir mit einem wasserlöslichen Kunststoff

Die Schnittstelle STL (Standard Transformation Language) ist ein Datenformat, mit dem die Oberfläche eines Bauteils annähernd beschrieben wird. Dazu werden auf der Oberfläche Dreiecke erzeugt und die Eckpunkte und der Normalenvektor in

das STL-File geschrieben. Bei ebenen Körpern kann die Geometrie so fast fehlerfrei beschrieben werden. Aber schon bei einem Zylinder können ebene Dreiecke die Oberfläche nicht genau abbilden. Es kommt zu einem Sekantenfehler (Abb. 2), der durch die Erhöhung der Anzahl der Stützpunkte auf dem Kreis reduziert werden kann. Dadurch kommt es wiederum zu einer Vergrößerung des STL-Files und verlängerten Rechenzeiten.

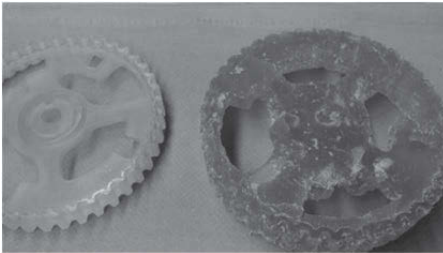


Abbildung 1: Modell mit wasserlöslicher Stützstruktur

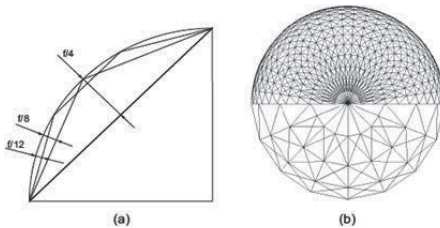


Abbildung 2: Sekantenfehler [Geb. 2013]

STL ist leider nicht standardisiert (nicht einmal der Name) und im Datensatz kommt es zu erheblichen Datenredundanzen, da für jedes Dreieck die Eckpunkte mitgeschrieben werden. Diese sind aber auch die Eckpunkte der benachbarten Dreiecke, so dass fast jeder Punkt dreimal beschrieben wird. Außerdem wird der Normalenvektor mitgeschrieben, der sich aber aus den drei Punkten errechnen lässt, wenn diese in der richtigen Reihenfolge abgespeichert werden und die Richtung über die Rechte-Hand-Regel definiert wird.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass man die Genauigkeit des STL-Files einstellen kann und damit verschiedene Resultate erzeugt. Im Regelfall lassen sich die Länge der Dreiecke und der Sekantenfehler in gewissen Stufen einstellen. Aber in Catia V5 beispielsweise werden, wenn man den Befehl „Speichern als“ → STL ausführt, die Grafikeinstellungen als Maß für die Genauigkeit des STL herangezogen und damit schwer nachvollziehbare Resultate geschaffen. Nur wenn die Triangulation direkt ausgeführt wird, hat man die erforderlichen Einstellmöglichkeiten und muss das entstandene Netz anschließend exportieren.

Prozesskette

Bei dem zu untersuchenden Objekt handelt es sich um den Innenring eines Zylinderrollenlagers mit einem Außendurchmesser von 37,5mm.

Dieser wurde aus folgenden Gründen ausgewählt:

- eine einfache, aber nicht ebene Form
- Standardbauteil mit hoher Qualität
- leicht im CAD nachzukonstruieren und parametrisierbar
- teilweise mit metallisch glänzenden Flächen

Dieses Bauteil wurde im CAD nachkonstruiert. Dazu wurde das Objekt genau vermessen (taktill mit Messschieber und Bügelmessschraube) und anschließend in CATIA V5 übertragen. Hier sind die üblichen Vereinfachungen bei der Modellbildung erfolgt (Rauheiten, Oberflächen und Toleranzen werden nicht abgebildet). Um das Modell möglichst klein zu halten, wurde das gesamte Bauteil durch Ausnutzung der Rotationssymmetrie mit nur einem Feature erzeugt. Dabei wird eine Skizze auf der xy-Ebene erstellt. Diese ist anfänglich ein einfaches Rechteck, welches durch Rotation um die z-Achse einen Ring ergibt. Die Fasen und Verrundungen werden nicht als zusätzliche Features angelegt, sondern direkt in die Skizze implementiert. Das einzig andere Feature ist die Materialzuweisung, die nötig ist, um

Schwerpunkte und Trägheitsachsen zu berechnen und deshalb immer erfolgen sollte.

Anschließend wurde das Modell mit dem Standard-Prüfprogramm von Volkswagen VALIDAT für Catia V5 geprüft.

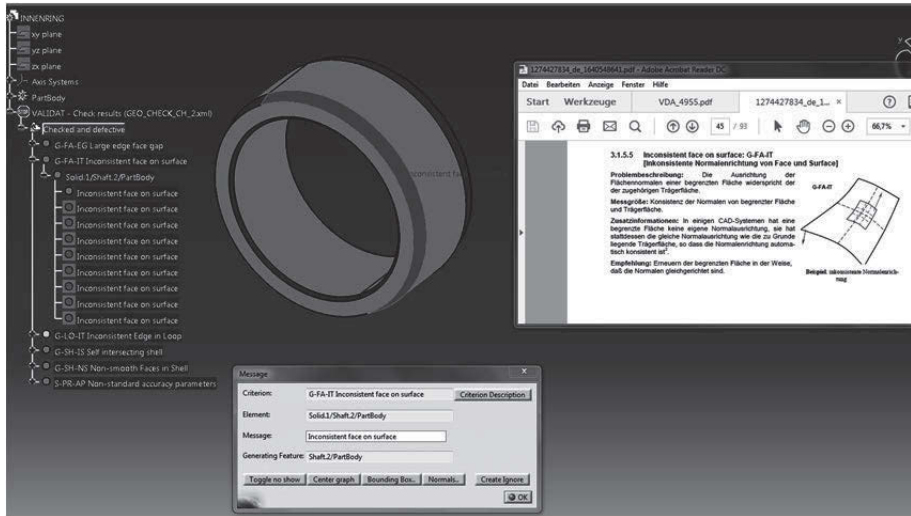


Abbildung 3: CAD-Modell mit Fehlerprotokoll

Hierzu wurde das Standard-Prüfprofil angepasst, so dass möglichst alle geometrischen Fehler gefunden werden, aber die VW-spezifischen Fehler (Name, Struktur, Context, usw.) nicht angezeigt werden. Das Protokoll des Prüflaufs wird direkt in das Modell geschrieben und erscheint im Strukturbaum. Dort können die geometrischen Fehler auch noch zusätzlich visualisiert werden. Die Anzeige dieser Fehler für das Modell des Innenrings ist in Abb.3 zu sehen

Hier fällt auf, dass bei solch simplem Bauteil, das direkt im Catia V5 erstellt wurde, schon mehrere Fehler auftreten, wenn die Messung nur genau genug ist.

Die Fehlerbeschreibungen ist hierbei auf die VDA 4955 bezogen, die wiederum auf der SASIG PDQ Guideline V2.1 basiert.

Die Namen folgen dabei immer dem Schema X-YY-ZZ (Domain-Representation-Parameter).

- G als Domain steht für ein geometrisches Kriterium.
- O für ein nichtgeometrisches (organisatorisches) Kriterium

— D für Drawing (Zeichnungskriterium)

Für diese Untersuchung sind besonders die geometrischen Fehler von Bedeutung. Diese gehen weit über die oft angeführten Lücken zwischen zwei Flächen hinaus. Die Fehler werden in verschiedene Kategorien unterteilt.

Bei näherer Betrachtung ergibt sich jedoch, dass sich diese geometrischen Fehler nicht ins STL-File fortsetzen, da dort nur Punkte und Vektoren enthalten sind. Das Netz ist aber an manchen Stellen ungenau oder zu kompliziert.

Triangulation

Das CAD-Modell hat beim Speichern das Catia-Format *.CATPart. Dieses wird anschließend trianguliert. Dazu wurden für diese Untersuchung verschiedene Methoden im Catia V5 genutzt:

- CATIA V5→Save as→STL
- Triangulation in CatiaV5→STL Export

Bei jeder Variante werden STL-Dateien mit den Standardparametern des Sekantenfehlers (0,2 mm) und verbesserten Einstellungen (0,02mm) erzeugt. Da bei der Triangulation von Hand die Parameter noch feiner eingestellt werden konnten, wurde ein weiteres Modell erstellt, bei dem der Sekantenfehler noch kleiner und die Länge der Dreieckskanten auf max. 1mm eingestellt wurde.

CATIA V5→Save As		Triangulation→STL-Export		
normale Parameter	bessere Parameter	normale Parameter	bessere Parameter	beste Parameter
104 kB	756 kB	19 kB	164 kB	557 kB
22	96	22	92	108
190	1386	190	1678	5700
380	2772	380	3556	11400
0,19085 mm	0,0100389 mm	0,19085 mm	0,01093 mm	0,007932 mm

Tabelle 1: Erzeugungsparameter der STL-Modelle

Die Unterschiede in der Dateigröße bei vergleichbaren geometrischen Informationen, beruhen auf der unterschiedlichen Art der Speicherung. Die STL-Datei kann als ascii-Text oder binär erstellt werden. Als ascii sind die Daten auch mit einem normalen Editor lesbar. Hier ein Beispiel für eins der Dreiecke:

```

facet normal 1.478649e-001 -2.499819e-001 9.568935e-001
  outer loop
    vertex -8.506143e+000 1.332069e+001 1.598079e+001
    vertex -7.487340e+000 1.370548e+001 1.592388e+001
    vertex -7.577277e+000 1.387011e+001 1.598079e+001
  endloop
endfacet

```

Die binäre Datei ist nicht ohne Interpreter lesbar, ist aber dafür etwa um den Faktor fünf kleiner.

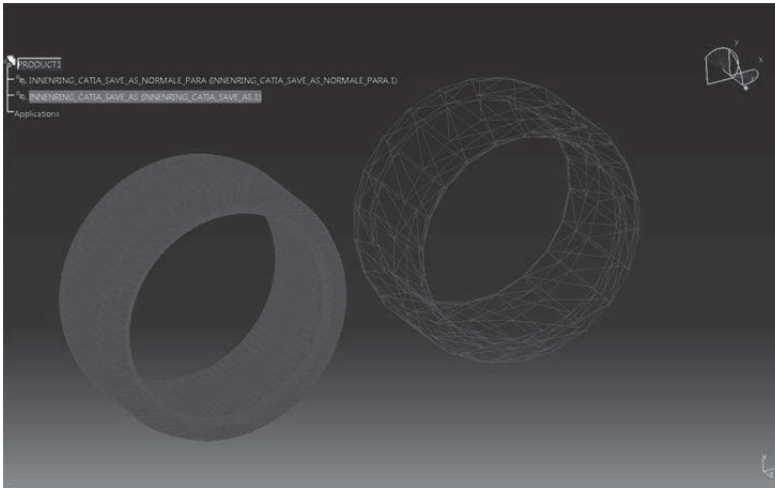


Abbildung 4: Triangulierte Modelle

3D-Drucken

Diese fünf Modelle wurden in den verschiedenen Ausprägungen im STL-Format an den 3D-Drucker „Objet Eden 330“ übergeben. Dieser arbeitet nach den PolyJet-Verfahren, bei dem mehrere Druckköpfe (hier zwei) Material auf eine sich schrittweise absenkende Plattform sprühen. Das Prinzip ähnelt einem herkömmlichen Tintenstrahldrucker. Das Material ist aber ein Fotopolymer, das in Schichtdicken zwischen 16 µm und 30µm aufgetragen und anschließend mittels einer am Druckkopf installierten UV-Lampe ausgehärtet wird.

Die fünf Modelle wurden nebeneinander angeordnet und aus zeitlichen Gründen in einem Vorgang gefertigt. Anschließend wurden die Modelle entformt, gereinigt und getrocknet.

Um die Maßhaltigkeit analysieren zu können, wurden die Modelle mit dem Streifenlichtscanner GOM ATOS Compact Scan 2M digitalisiert. Dabei entstehen Punktwolken mit ca. 40.000 Punkten pro Scan. Ein Scan besteht aus einer bestimmten Anzahl von Einzelaufnahmen, die eingestellt werden kann. Bei der Messung mit Drehtisch sind bei einfachen Modellen 6 oder 8 Aufnahmen üblich, also eine Rotation um je 60° oder 45° zur letzten Aufnahme. Damit auch die Rück- oder Unterseite gescannt werden kann, müssen Referenzpunkte auf das Scanobjekt geklebt werden, mithilfe derer verschiedene Messreihen zueinander transformiert werden können.

Die meisten Fehler beim Scannen entstehen durch Reflexionen und Überbelichtung. Die Überbelichtungen lassen sich durch Einstellungen am Scanner mit etwas Erfahrung verringern. Reflexionen können vermieden werden, indem der Winkel, mit dem der Scanner das Objekt beleuchtet, geschickt gewählt und das Scanobjekt mit Kreidespray mattiert wird. Dieses Kreidespray beeinflusst jedoch die Geometrie, da es eine zusätzliche Schicht darstellt, die auf dem eigentlichen Meßobjekt aufgetragen wird. Außerdem können durch das Spray Poren und Risse verschlossen werden.

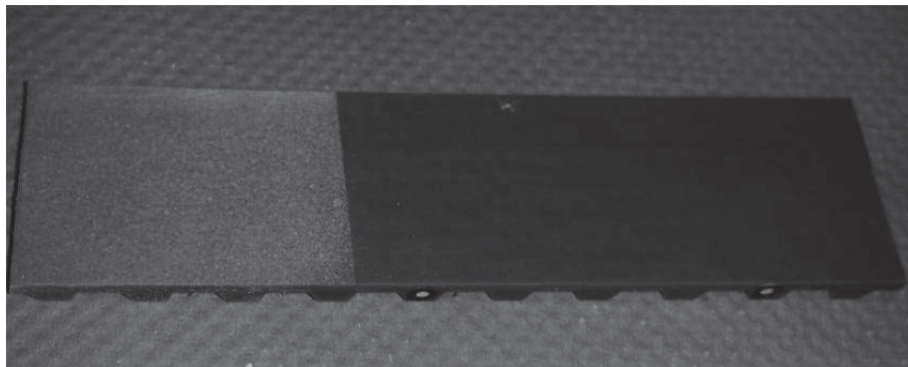


Abbildung 5: Zahnriemen teilweise mit Kreidespray

Zur Bestimmung der Schichtdicke des Kreidesprays waren aufwendige Messungen nötig. Die Resultate hängen stark von der Oberflächenbeschaffenheit und der Dauer des Besprühvorgangs ab. Nach Auswertung der Messungen ergibt sich, bei einem Sprühabstand von 30 cm und zwei kurzen Sprühstößen eine mittlere Schichtdicke von $91 \mu\text{m}$.

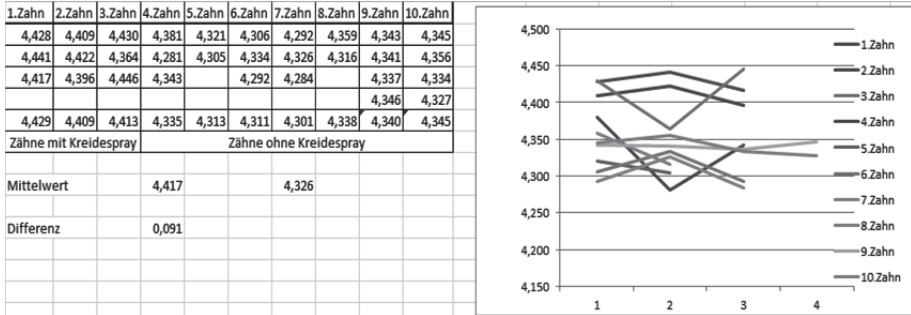


Abbildung 6: Auswertung der Schichtdickenmessung

Analyse

Nach dem eigentlichen Scannen wird die Polygonisierung durchgeführt. Hierbei werden aus den Punkten der Punktwolken Dreiecke gebildet, die zu einem Netz zusammengeführt werden. In Gegensatz zum direkt aus dem CAD erzeugten Netz, hat dieses Netz viel mehr Punkte und ist auch nicht so gleichmäßig. Der als Beispiel benutzte Innenring hat nach 2 Scans (Vorder- und Rückseite) mit je 8 Einzelmessungen über 84.000 Punkte. Im Vergleich dazu hatte das aus den CAD erzeugte STL mit höherer Qualität 1678 Punkte.

Da die Polygonisierung durch automatische Algorithmen berechnet wird, kommt es zu einer großen Anzahl an Lücken, Fragmenten, und Unebenheiten im Netz. Ein großes Problem ist oft die hohe Anzahl an Nicht-Mannigfaltigkeiten. Das sind Krümmungsknicke in Flächen, die nur schwer zu reparieren sind. Bei einer automatisierten Reparatur, die bei so vielen Flächen meist gewählt wird, entstehen aber Flächen, die geometrisch von der Punktwolke abweichen und so das Ergebnis verfälschen.

Um diese Fehler zu minimieren werden Werkzeuge in der Scanner-Software angeboten, mit denen man die Löcher füllen und das Netz glätten kann. Die Erzeugung einer guten Punktwolke und die Reparatur des Netzes erfordern aber eine große Erfahrung und kosten Zeit. Die automatischen Hilfsmittel führen zwar zu Daten, die im weiteren Prozess nutzbar sind, aber durch die unvorhersehbaren Ergebnisse der Algorithmen schlechte Ergebnisse mit großen Abweichungen von der Originalgeometrie liefern.

Nach der Polygonisierung und dem Bilden des Netzes gibt es zwei Möglichkeiten, die Qualität der gescannten Daten zu überprüfen. Entweder über einen Flächenvergleich oder die Flächenrückführung, bei der die Daten über mehrere Schritte wieder ins CAD gebracht werden.

Es besteht zwar auch die Möglichkeit, den Datensatz direkt als STL ins CAD zu laden, aber durch die Art des Datensatzes ist hier nur eine visuelle Kontrolle möglich. Es gibt eben nur Punkte und Dreiecke, aber beispielsweise keine Zylinder, so dass eine Analyse des Durchmessers einer Bohrung nicht möglich ist.

Beim Flächenvergleich wird ein Referenzdatensatz benötigt. In diesem Beispiel wurde der Innenring, der im CAD-System CATIA V5 nachkonstruiert wurde, genutzt. Der Referenzdatensatz und der gescannte Datensatz werden zusammen geladen und dann der minimale Abstand jedes Punktes von der Originalgeometrie angezeigt.

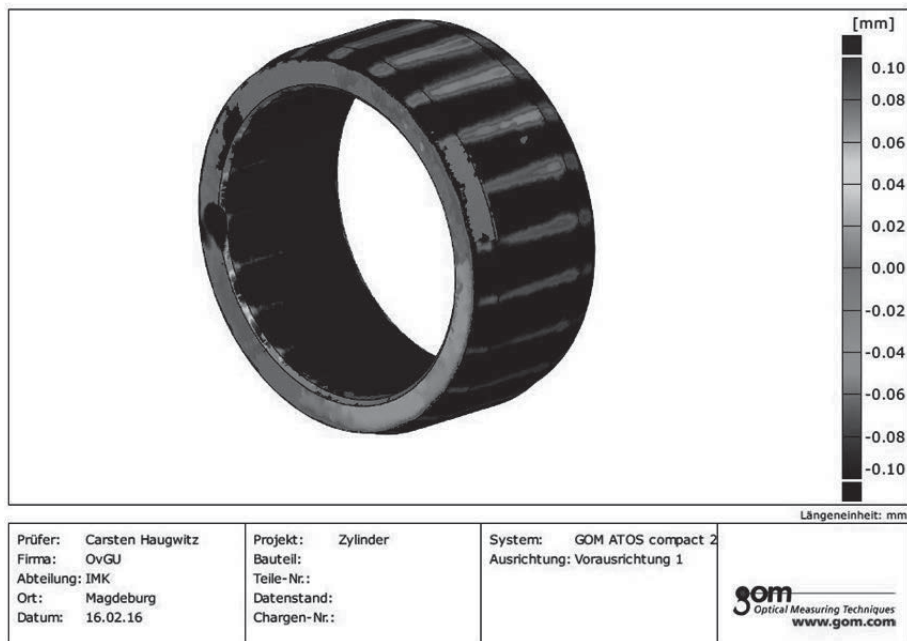


Abbildung 7: Flächenvergleich

In der Abb. 7 ist durch die andersfarbigen Streifen die Abweichung zu erkennen, die sich beim Erstellen des STL Datensatzes ergibt, da Kreise mittels Punkten und Geraden in Segmente geteilt werden. Diese Abweichung ist hier dunkelblau zu sehen und war hier zu erwarten, da der STL-Datensatz mit Sekantenfehler zum Drucken verwendet wird. Daraus, dass der Ring außen überwiegend blau ist und innen meist rot, kann man erkennen, dass der Zylinder geschrumpft ist. Die Ursache ist wahrscheinlich ein

kleiner Volumenverlust beim Trocknen des Modells. In Z-Richtung ist dieser aber nicht erkennbar, so dass angenommen werden kann, dass die Schichtdicke von diesem Volumenverlust nicht betroffen ist.

Auswertung und Überprüfung

In der Abb. 8 ist mit Hilfe der Abweichungsfähnchen gut zu erkennen, dass die Abweichungen regelmäßig auftreten und auf den Sekantenfehler bei der Triangulation zurückzuführen sind. Die Abweichung von 0,19 mm entspricht relativ genau der durch Berechnung vorhergesagten Abweichung von 0,19085 mm. Die Abweichungen in der Z-Achse, wo kein Fehler vorhergesagt wurde, bewegen sich zwischen 0,03 mm und max. 0,10 mm. Auf der Innenseite des Ringes sollte die Abweichung sogar etwas kleiner als 0,19085 mm sein. Hier war ein Fehler von 0,1526 mm vorher berechnet wurden. Die wirkliche Abweichung beträgt jedoch bis zu 0,29 mm.

Auch hier bewegen sich die Messwerte innerhalb der vorher berechneten Werte. Die Abweichung von ca. 0,1 mm durch das Spray als neue Schicht ist hiermit als gesichert anzunehmen.

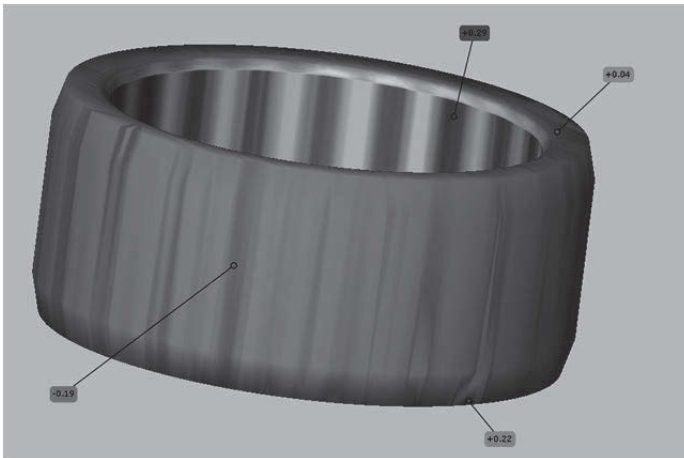


Abbildung 8: punktuelle Messung

Der zweite Weg der Überprüfung der Daten, ist die Flächenrückführung. Dabei wird über die durch das Netz repräsentierte Oberfläche eine Nurbs-Fläche (Nurbs-Non uniform rational B-Spline) gelegt. Dazu muss das Netz frei von Lücken und Knicken sein und die Flächennormalen müssen ausgerichtet sein (vom Teil weg). Die dann geschlossene Fläche kann zu einem

Solid gewandelt werde, so dass man virtuell wieder ein Loch hinein bohren könnte. Aber eine wirkliche Änderung der Daten ist auch hier kaum möglich.

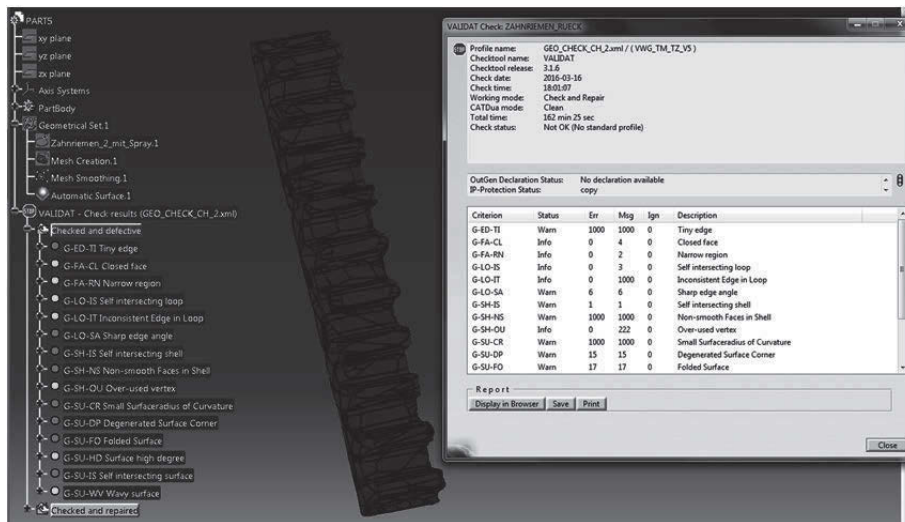


Abbildung 9: Überprüfung mit Validat

Eine Analyse der Daten mit VALIDAT kann nun durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in der Abb. 9 zu sehen. Das Beispiel hier ist das Teilstück des Zahnriemens, der für die Messung der Schichtdicken des Kreidesprays genutzt wurde.

Literaturverzeichnis

- [Kuhlmann 2015] Kostenreduktion beim Vakuum-Differenzdruckgießen durch additiv gefertigte, hohle Ausbrennmodelle; OvGU Magdeburg; Diss 2015
- [Pahl et al. 2007] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J., Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. Berlin, Springer-Verlag, (2007) – ISBN 978-3-540-34060-7
- [Danjou 2008] Danjou S., Koehler H. (2008). Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, Vol. 5(2008).
- [Geb 2013] A. Gebhardt: Generative Fertigungsverfahren; 4.Aufl.; München, Hanser Verlag 2013

Kontakt

Dipl.-Ing. Carsten Haugwitz
Otto-von-Guericke Universität
Institut für Maschinenkonstruktion (IMK)
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
carsten.haugwitz@ovgu.de